第39卷 第2期
2022年3月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 2
Mar. 2022

基于农业水足迹的水资源安全时空变化分析
——以新疆和田地区为例

张丽丽[1,2]， 邓晓雅[2]， 龙爱华[1,2]， 高海峰[3]， 任 才[1,2]， 李志赟[1,2]

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832000；2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100038；3. 生态环境部卫星环境应用中心，北京 100094）

摘 要：和田地区是典型的内陆干旱区，研究区域水资源安全对指导水资源开发利用，促进社会经济与水资源可持续发展具有重要意义。本文基于水足迹理论，研究和田地区1989—2018年农作物生产和动物产品生产的农业生产水足迹的组成及时空变化，通过水足迹强度和水资源压力指标从水资源消耗和污染两个角度分析和评价水资源安全状态的时空变化。结果表明：和田地区农业生产水足迹经历了快速增长、缓慢增长和明显下降3个阶段，以农作物生产水足迹与动物产品生产水足迹约8:2的比例组成。各阶段变化以农作物生产蓝水足迹的增减为主导，在空间上呈西高东低分布；水足迹强度呈对数的趋势减小，至2018年缩小为原来的1/19。和田地区水资源压力值均在1以下变化，水资源多年来均处于安全状态，近10 a的水资源压力程度较高。多年来，和田地区农业生产水足迹随时间变化波动增长，水资源利用效率显著提升，而水资源压力也同步增加，不断威胁着区域的水资源安全。

关键词：农作物生产水足迹；动物产品生产水足迹；灰水足迹；水资源安全；和田地区

水资源作为人类社会生存发展和自然生态环境良性循环的控制性因素，在消耗需求与污染程度的不断增长和加剧的全球化背景下，水资源的保护利用与水资源安全面临着严峻的挑战，也成为了众多学者的研究热点[1-2]。位于我国西北部的新疆和田地区，水资源量匮乏、气候干燥、生态环境脆弱，在不断扩大地社会经济建设需求下，水资源问题也更加突出[3-4]。研究和田地区的水资源消耗规律，分析水资源安全状态，可为决策部门提供水资源调控的指导意见，从而实现缓解区域水资源压力，协调可用水资源量与社会经济发展和生态环境保护的耗水需求。

水资源安全是指既能满足人类社会生存环境和经济发展需求，又能支持国家安全、人类健康和生态系统服务的水资源相关风险的可接受水平[5]。对于水资源安全的研究，大量学者从不同的角度进行了众多的研究，目前可主要分为以下三个角度：(1) 从构建综合评价指标体系的水资源安全评价角度，贾绍凤等[6]学者从优化指标结构、精准化评价指标算法[7]和精确化水资源安全等级划分标准[8]等方面不断推进和深入水资源安全的研究。(2) 从供水量和需水量的关系角度出发，刘丽颖等[9]考虑了气候变化下的区域供水量变化，研究自然水资源赋存对水资源安全的影响。张城等[10]通过对不同耗水情景的分析，研究不同水资源需水配置时的水资源安全问题。(3) 在以往的研究中，由于存在用水量统计不准确、以虚拟水形式存储于产品中的水资源难以统计等问题，Hoekstra[11]提出了水足迹的概念，其后Falkenmark等[12]和Veettil等[13]从水足迹的角度为水资源安全研究注入了新视角；随着不断显现的水质问题，Feng等[14]开始以水资源污染、水质性缺水[15]等角度，评价水质影响下的水资源安全。通过构建指标体系来评价的水资源安全，很大程度上受限于所选指标，同时也受到一定的主观因素影响，而仅从水量供需平衡或水污染的某一方面评价区域水资源安全则存在片面性。综合考虑人类对水资源

收稿日期：2021-08-07； **修订日期：**2021-10-24
基金项目：国家自然科学基金(52179028，51609260)；中国工程院咨询项目(2020-XZ-15，2020-XY-41)
作者简介：张丽丽(1998-)，女，硕士研究生，主要从事水资源安全评价方面的研究. E-mail: 2573745042@qq.com
通讯作者：龙爱华. E-mail: ahlong@iwhr.com.

安全重点关注的供需问题，以及随着社会发展变得不可忽视的水污染问题将是本文对水资源安全研究的关注点。本文从水足迹角度出发，分析水资源消耗及污染下的和田地区水资源安全的时空变化及其主要影响因素。

水足迹是指一个国家或地区，生产一定人群(个体、城市或国家)消费的产品和服务所需的水资源数量，包括蓝水、绿水与灰水足迹。其中蓝水足迹是指产品在其供应链中对蓝水(地表水和地下水)资源的消耗；绿水足迹是指对绿水(不会成为径流的雨水)资源的消耗；灰水足迹是与污染有关的指标，定义为以自然本底浓度和现有的环境水质标准为基准，将一定的污染物负荷吸收同化所需的淡水体积[16]。因水足迹的概念直观，且能够弥补以往水资源核算中范围不全面、精度不高的问题，所以在水资源评价的研究中得到了广泛应用[17]。通过水足迹的角度以虚拟水-实体水相结合的方式量化区域水资源消耗，以及从水消耗和水污染的水足迹角度进行水资源评价，是目前以水足迹方法评价水资源的两种主要方式。新疆因其独特的地理位置及干旱的气候环境，成为了水资源评价研究的热点地区。通过水足迹的方法，金谦等[18]以农作物生产的蓝水与绿水足迹之和近似代替农业生产水足迹，分析新疆农业生产用水的时空分布。常玉亭等[19]以单位产品的虚拟水含量估算新疆农业生产水足迹，结合实体水消耗量评价区域的水资源承载力。新疆是传统的农业经济结构，农业用水长期占总用水的95%以上，而畜牧业作为新疆的基础产业之一，总产值占农业总产值的30%以上，所以畜牧业的耗水在水资源核算中不可忽视。而现有的研究大多忽视了畜牧业用水在农业用水中的占比，且存在水足迹核算不精确的问题。因此，本文以农业生产为耗水主体，从蓝水、绿水和灰水足迹角度量化分析和田地区农作物生产和动物产品生产的农业生产水资源消耗与污染，评价区域的水资源安全状况。

近年来，在当地强烈的经济发展、脱贫攻坚建设小康和田的驱动下，和田河流域人类社会与自然环境的用水竞争日趋紧张，水资源安全问题日益突显。本文以新疆和田地区为例，通过分析1989—2018年的农业生产水足迹，构建水资源效率指标和水资源压力指标分析评价和田地区的水资源安全状态变化，以期为区域水资源安全保障与决策提供一定的参考依据。

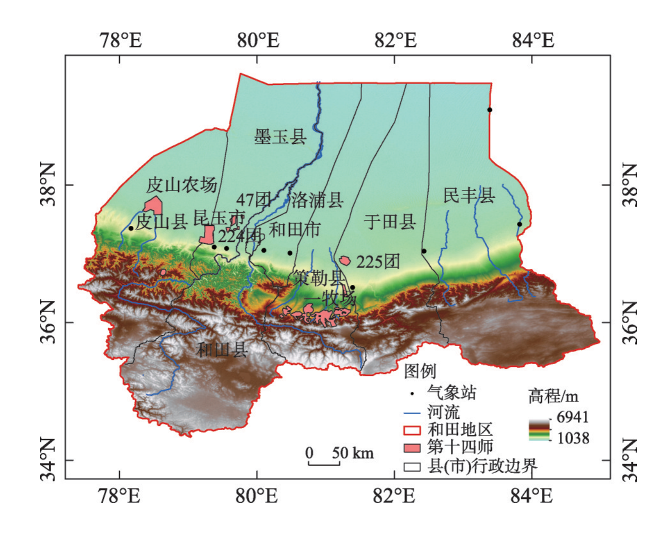
1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

和田地区位于欧亚大陆腹地，新疆维吾尔自治区的最南端(77°20′~85°E，34°~39°30′N)，总面积24.78×10^4 km²，辖区包括7县1市，91个乡镇(图1)，属典型的内陆干旱区。全年降水稀少，光照充足，热量丰富，无霜期长，昼夜温差大。年均降水量35 mm，蒸发量2480 mm，地表径流补给主要依靠冰川积雪融化及部分高山降水，河流径流量的年际变化大，年均上下浮动在20%~40%。境内分布大小河流36条，年径流量74×10^8 m³，其中玉龙喀什河与喀拉喀什河两河水量占全区各河总水量的61.2%，两河在阔什拉什附近汇合为和田河，成为阻隔塔克拉玛干沙漠东西合并的重要生态廊道[20]。由《新疆水资源公报》可知，和田地区多年平均农业用水量超过总用水量的95%，其中农作物种植的灌溉用水与动物养殖的畜牧业用水约以7:3的比例组成农业用水量。据《2018和田统计年鉴》显示，和田地区现有规模以上灌区44处，主要以小型灌区为主，其中3.33×10^4 hm²以上规模灌区两处，133~667 hm²灌区21处，农作物种植以小麦、杂粮和棉花为主。

1.2 数据来源

本文计算农业生产水足迹所需的农作物种植



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2019)3333号、新兵S(2020)001号，对底图边界无修改。下同。

图1　和田地区地理位置图

Fig. 1　Geographical location map of Hotan Prefecture

面积、化肥使用量、动物头数和计算水足迹效率指标所需的GDP来源于《新疆统计年鉴》(1990—2019)、《新疆生产建设兵团统计年鉴》(1990—2019);计算水资源压力指标所需的和田地区可用水资源量来源于《新疆水资源公报》(2001—2018);计算作物蒸发蒸腾量所需的和田地区各气象站1989—2018年降雨量、平均风速、相对湿度、最高温度、最低温度等气象数据来源于国家气象科学数据共享服务中心(http://data.cma.cn)。

为了研究区域整体的水资源安全状况,本文的研究范围包括兵团第十四师。并将各团场包含在所在辖区计算和分析农业生产水足迹,不单独分析兵团。

1.3 研究方法

1.3.1 *农业生产水足迹计算方法* 本文基于水足迹理论,从生产者的角度计算和田地区农业生产的蓝水、绿水和灰水足迹。其中,结合各污染物排放量、环境敏感性和数据的可获取性,选择主要排放的污染物离子化学需氧量(COD)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)和总磷(TP)作为灰水足迹研究的污染物。

以农作物种植和动物水足迹表示和田地区的农业生产水足迹,计算公式为:

$$WF_{agr} = WF_{cul} + WF_{ani} \tag{1}$$

式中:WF_{agr}为农业生产水足迹;WF_{cul}为农作物生产水足迹;WF_{ani}为动物产品生产水足迹。

1.3.2 *农作物生产水足迹* 农作物生产水足迹是指作物在生长过程中所消耗的水资源量[21],依据消耗水资源的类型及其对环境的影响,可进一步划分为蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹。计算方法如公式(2)所示:

$$WF_{cul} = WF_{cul-blue} + WF_{cul-green} + WF_{cul-grey} \tag{2}$$

式中:WF_{cul}为农作物生产水足迹($m^3 \cdot t^{-1}$);$WF_{cul-blue}$、$WF_{cul-green}$和$WF_{cul-grey}$分别为农作物生产蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹($m^3 \cdot t^{-1}$)。

$$WF_{cul-green} = \frac{CWU_{green}}{Y} = \frac{10 \times \sum_{d=1}^{\lg p} ET_{green}}{Y} \tag{3}$$

$$WF_{cul-blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} = \frac{10 \times \sum_{d=1}^{\lg p} ET_{blue}}{Y} \tag{4}$$

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_e)$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_e)$$

$$ET_c = K_c ET_0$$

式中:CWU_{green}和CWU_{blue}为作物绿水、蓝水用量($m^3 \cdot hm^{-2}$);Y为作物单位面积产量($t \cdot hm^{-2}$);ET_{green}和ET_{blue}为作物绿水和蓝水需水量(mm);10是常量因子;求和$\sum$是从开始种植日期到收获日期的积累量($\lg p$表示生长期的长度,以日计量);ET_c为作物蒸发蒸腾量(mm);K_c为作物系数,采用FAO-56推荐的标准作物系数和修正公式,并依据研究区气候、土壤、作物和灌溉条件进行修正;ET_0为参考作物蒸发蒸腾量($mm \cdot d^{-1}$),采用Penman-Monteith公式计算;P_e为有效降雨量($mm \cdot d^{-1}$)。

农作物生产的灰水足迹,主要是指化肥施用后,未被充分利用的肥料经灌溉水或者雨水淋溶进入河流,产生污染性离子,将其稀释至标准浓度所需的水资源量[22]。本文以和田地区施用量最大的氮肥和磷肥作为污染性离子的主要来源,分析农作物生产灰水足迹。同一水体可以同时稀释多种污染物,所以灰水足迹由最大污染物离子稀释所需水量决定[23]。计算公式如公式(5)所示:

$$WF_{cul-grey} = \max\left(\frac{\alpha_{TN} \times L_{nit-fer}}{C_{max}^{TN} - C_{min}^{TN}}, \frac{\alpha_{TP} \times L_{pho-fer}}{C_{max}^{TP} - C_{min}^{TP}}\right) / Y \tag{5}$$

式中:α_{TN}、α_{TP}分别为氮肥和磷肥的肥料淋失系数,取自《第一次全国污染源普查-农业污染源肥料流失系数手册》;$L_{nit-fer}$、$L_{pho-fer}$分别为氮肥、磷肥的折纯施用量(kg);C_{max}^{TN}、C_{max}^{TP}为TN、TP达到环境水质标准情况下的污染物最高浓度,$C_{max}^{TN}=0.01\ kg \cdot m^{-3}$,取自US-EPA标准;$C_{max}^{TP}=0.005\ kg \cdot m^{-3}$,取自《GB8978-2002污水综合排放标准》;C_{min}^{TN}、C_{min}^{TP}为受纳水体TN和TP的初始浓度,假设为0。

本文以和田地区主要种植的作物为研究对象,包括粮食作物(水稻、小麦、杂粮、豆类),经济作物(棉花、油料、甜菜、蔬菜、甜瓜、薯类、苜蓿)和果类(葡萄、苹果、梨、枣、其他水果),分析1989—2018年和田地区各县市、不同作物的水足迹变化规律。

1.3.3 *动物产品生产水足迹* 动物产品生产水足迹是指每种动物从出生到出栏整个生命周期内的水足迹,包括以虚拟水和直接用水形式消耗的成长、加工饲料用水,饮用水和清洗服务用水,以及以动物排泄物为主的灰水足迹[24-26]。计算公式如下所示:

$$WF_{ani} = WF_{ani-feed} + WF_{ani-drink} + WF_{ani-serve} + WF_{ani-grey} \tag{6}$$

式中：$WF_{ani\text{-}feed}$、$WF_{ani\text{-}drink}$、$WF_{ani\text{-}serve}$、$WF_{ani\text{-}grey}$分别为饲料用水、饮用水、服务用水和灰水足迹($m^3 \cdot t^{-1}$)。

$$WF_{ani\text{-}feed} = \frac{\int_{birth}^{death}\left(Q_{mix} + \sum_{i=1}^{N} SWC_i \times C_{ij}\right)dt}{W_i} \quad (7)$$

$$WF_{ani\text{-}drink} = \frac{\int_{birth}^{death} Q_d^i dt}{W_i} \quad (8)$$

$$WF_{ani\text{-}serve} = \frac{\int_{birth}^{death} Q_s^i dt}{W_i} \quad (9)$$

$$WF_{ani\text{-}grey} = \max\left(\frac{P_i^k \times \rho_i^k}{C_{max}^k - C_{min}^k}\right)/Y \quad (10)$$

式中：Q_{mix}表示混合饲料所需水量($m^3 \cdot d^{-1}$)；C_{ij}为第i种动物消耗饲料j的重量($t \cdot d^{-1}$)；SWC_i表示饲料i所含的虚拟水量($m^3 \cdot t^{-1}$)。饲料作物虚拟水量使用农作物生产水足迹的方法计算，按照不同饲料作物的配比(重量)进行加权计算；W_i为第i种动物出栏时的重量(t)；Q_d^i、Q_s^i分别为动物i每日所需饮用水和清洗服务用水量($m^3 \cdot d^{-1}$)；P_i^k为第i种动物年粪尿中k污染物的产生量(kg)；ρ_i^k为第i种动物年粪尿中k污染物进入水体的流失率，取自《全国规模化畜禽养殖业污染情况调查技术报告》；k为污染物类型，可取COD、TN、TP、$NH_4^+ - N$；$C_{max}^{COD} = 0.06\ kg \cdot m^{-3}$，$C_{max}^{NH_4^+ - N} = 0.015\ kg \cdot m^{-3}$，取自《GB8978-2002污水综合排放标准》；C_{min}^{COD}、$C_{min}^{NH_4^+ - N}$均假设为0；其中下标max表示环境水质标准中的各污染离子值，min表示受纳水体的自然本底浓度。其余与上述相同。

本文使用活体动物数据，去除成长、饲料加工用水中与农作物生产水足迹重合的饲料作物生产水足迹，计算1989—2018年和田地区主要饲养的5类禽畜(牛、马、猪、驴、羊)的动物水足迹。

1.4 水资源安全评价指标

本文采用水足迹强度指标和水资源压力指标分析评价和田地区水资源安全状况(表1)。《水足迹评价手册》定义一种产品的水足迹是指用于生产该产品的整个生产供应链的用水量之和，是一个体现消耗水量、水源类型以及污染量和污染类型的多层面的指标。其中蓝水足迹和绿水足迹主要反映消耗的水量及水源类型，灰水足迹则旨在反映污染量和污染类型。为了便于评价指标计算及结果分析，本文结合水足迹指标的定义，将水足迹中以虚拟水和直接用水形式消耗的部分称为农业生产非灰水足迹，包括农作物生产非灰水足迹的$WF_{cul\text{-}blue}$、$WF_{cul\text{-}green}$和动物产品生产非灰水足迹的$WF_{ani\text{-}feed}$、$WF_{ani\text{-}drink}$及$WF_{ani\text{-}serve}$；则WF_{agr}可表示为：

表1　水资源安全评价指标

Tab. 1　Evaluation index of resource security

指标类型	名称	计算公式
水足迹效率指标	水足迹强度(WFS)/($m^3 \cdot a^{-1}$)	WF_{agr}/GDP
	灰水足迹强度(WFS_{pol})/($m^3 \cdot a^{-1}$)	WF_{grey}/GDP
	水足迹消耗强度(WFS_{con})/($m^3 \cdot a^{-1}$)	WF_{con}/GDP
水资源压力指标	水资源压力(WFP)	WF_{agr}/Q
	水污染程度(WFP_{pol})	WF_{grey}/Q
	水消耗程度(WFP_{con})	WF_{con}/Q

$$WF_{agr} = WF_{con} + WF_{grey} \quad (11)$$

$$WF_{con} = WF_{cul\text{-}con} + WF_{ani\text{-}con} \quad (12)$$

$$WF_{grey} = WF_{cul\text{-}grey} + WF_{ani\text{-}grey} \quad (13)$$

式中：WF_{con}为农业生产非灰水足迹($m^3 \cdot t^{-1}$)；WF_{grey}为农业生产灰水足迹($m^3 \cdot t^{-1}$)；$WF_{cul\text{-}con}$、$WF_{cul\text{-}grey}$分别为农作物生产非灰水足迹、农作物生产灰水足迹($m^3 \cdot t^{-1}$)；$WF_{ani\text{-}con}$、$WF_{ani\text{-}grey}$分别为动物产品生产非灰水足迹、动物产品生产灰水足迹($m^3 \cdot t^{-1}$)。

水资源安全评价指标包括水足迹强度和水资源压力指标，水足迹强度指标用来反映水资源的利用效率，以单位国民生产总值的农业生产水足迹来表示。水足迹强度值越小，表示单位GDP所消耗的水资源越少，水资源利用效率越高。反之亦然。计算公式为：

$$WFS = \frac{WF_{agr}}{GDP} = \frac{WF_{con} + WF_{grey}}{GDP} = \frac{WF_{con}}{GDP} + \frac{WF_{grey}}{GDP} \quad (14)$$

水资源压力指标反映水资源的压力状态和水资源利用的安全程度，用农业生产水足迹与可用水资源量(Q)的比值来表示[27]。计算公式为：

$$WFP = \frac{WF_{agr}}{Q} = \frac{WF_{con} + WF_{grey}}{Q} = \frac{WF_{con}}{Q} + \frac{WF_{grey}}{Q} \quad (15)$$

式中：WFP<1，表明区域可用水资源量能够满足耗水需求，区域水资源处于安全状态；WFP=1，表明水资源处于临界安全状态，可用水资源量与耗水需求相等；WFP>1，表明耗水量超过了可用水资源量，水资源利用状态为不安全。

为了更好评价和田地区的水资源压力状态，本文参考文献[28]对水资源压力指标进行等级划分(表2)。

表2 水资源压力等级划分标准

Tab. 2 Standard for classification of water resource pressure

等级	取值范围	水资源压力
Ⅰ	≤0.20	极低
	0.20~0.30	很低
	0.30~0.40	较低
Ⅱ	0.40~0.50	中下
	0.50~0.60	中等
	0.60~0.70	中上
Ⅲ	0.70~0.80	较高
	0.80~0.90	很高
	>0.90	极高

2 结果与分析

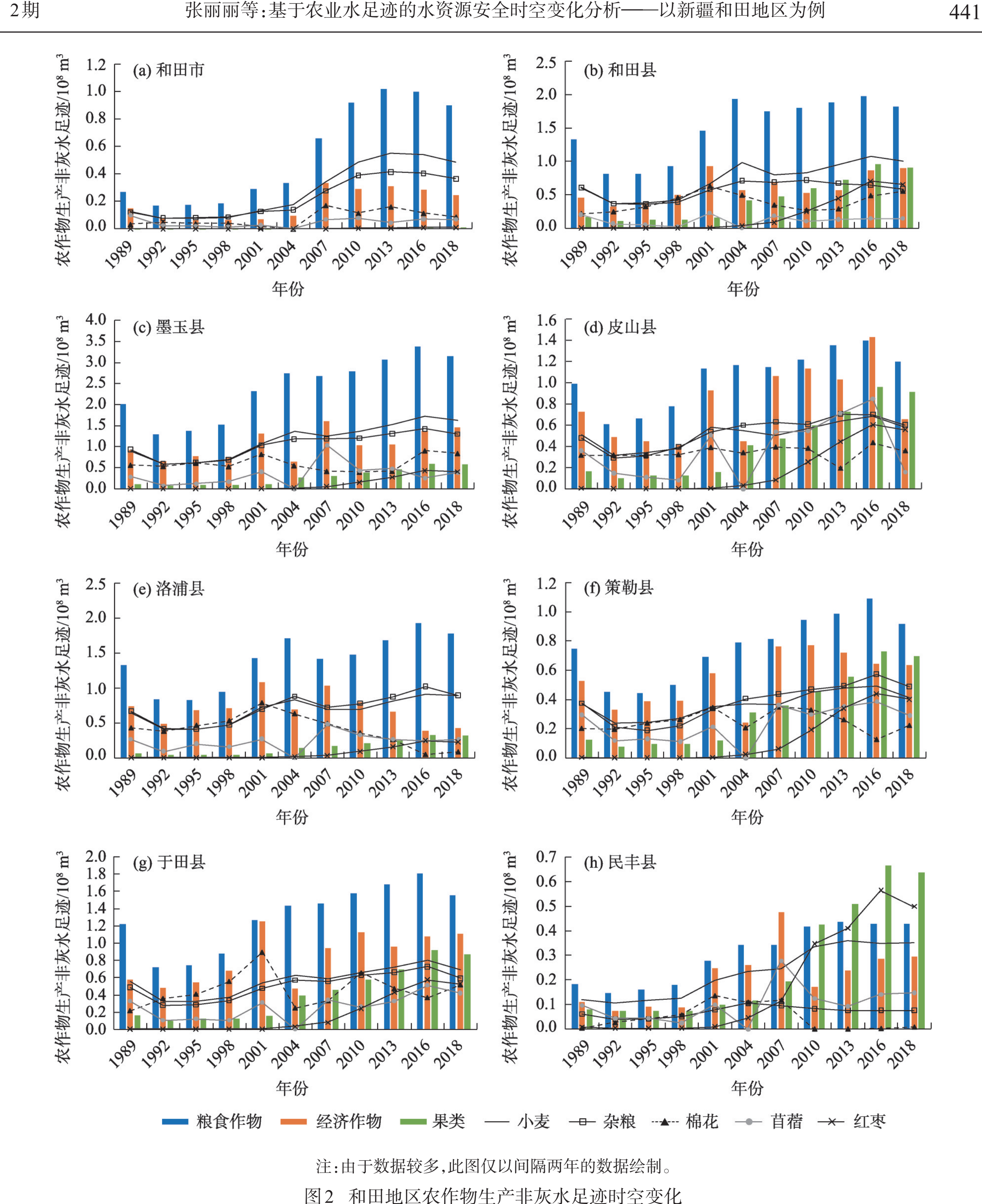
2.1 农业生产非灰水足迹

2.1.1 *农作物生产非灰水足迹* 农作物生产非灰水足迹($WF_{cul\text{-}con}$)是农作物生产绿水足迹($WF_{cul\text{-}green}$)与蓝水足迹($WF_{cul\text{-}blue}$)之和,反映农作物生产对水资源的消耗。和田地区1989—2018年不同农作物类型(粮食作物、经济作物、果类)、主要的水资源消耗农作物(小麦、杂粮、棉花)和特色农作物(苜蓿、红枣)生产非灰水足迹如图2所示。各县市$WF_{cul\text{-}con}$均呈波动增长变化,其中以粮食作物消耗为主,经济作物消耗次之。除民丰县外,各县、市$WF_{cul\text{-}con}$均呈波动增长变化,其中以粮食作物消耗为主,经济作物消耗次之。小麦、杂粮、棉花和苜蓿为和田地区种植面积最广的4种农作物,其蓝水和绿水足迹之和可占各县市$WF_{cul\text{-}con}$的59%~96%。随时间的变化,小麦和杂粮的$WF_{cul\text{-}con}$总体呈波动增长,而棉花和苜蓿则由于种植面积受政策引导的影响,其$WF_{cul\text{-}con}$呈现不规律的大幅度增减变化;红枣作为和田地区的特色经济作物,$WF_{cul\text{-}con}$从2003年开始明显增长。耗水量快速增加,与和田地区红枣产业的推广和种植业的政策性鼓励密切相关[29]。在区域的红枣种植业中,和田市无明显增长,民丰县增长最为显著。从2010年开始,民丰县在以红枣耗水为主的经济作物的蓝水、绿水足迹的快速增长下,经济作物超过了粮食作物与果类的生产耗水量,至2018年红枣的$WF_{cul\text{-}con}$已达到农作物生产非灰水足迹的46.3%,成为当地农民经济增收和提高全县人均收入的重要农作物。和田地区的$WF_{cul\text{-}con}$在空间上,以墨玉县最大,年均$WF_{cul\text{-}con}$为3.80×10^8 m^3;民丰县最小,年均$WF_{cul\text{-}con}$仅为0.76×10^8 m^3。$WF_{cul\text{-}con}$显著的空间差异是由和田地区水资源空间分布和种植业区间发展的共同作用引起,在和田地区各县市中,以墨玉县为首的和田县、洛浦县人口较多,农作物种植面积广,农业总产值较高,农业经济相对发达。各县在地理位置上紧邻和田河,农作物种植的水资源消耗需求得到了有效保障,所以在因种植大面积农作物而变大的水资源消耗需求下及和田河的水资源量支撑下,和田地区的墨玉县、和田县和洛浦县$WF_{cul\text{-}con}$明显高于其他县、市。

2.1.2 *动物产品生产非灰水足迹* 动物产品生产非灰水足迹($WF_{ani\text{-}con}$)包括成长、加工饲料($WF_{ani\text{-}feed}$)用水,饮用水($WF_{ani\text{-}drink}$)和清洗服务($WF_{ani\text{-}serve}$)用水,反映了动物从出生到出栏消耗的水资源量。和田地区1989—2013年$WF_{ani\text{-}con}$随时间变化呈不平稳增长的变化趋势,2013年和田地区$WF_{ani\text{-}con}$为8.84×10^8 m^3,较1989年增长381.78%。而后$WF_{ani\text{-}con}$出现回落,至2018年为5.94×10^8 m^3,较2013年减少32.8%(图3)。动物数量的变化对和田地区$WF_{ani\text{-}con}$改变有直接影响,在饲料结构相对稳定、服务用水和饮用水标准不变的情况下,和田地区大小牲畜由2013年971×10^4头(只)减少至2018年758×10^4头(只),减少21.95%,引起和田地区$WF_{ani\text{-}con}$减少。各县、市对和田地区动物水资源消耗的贡献,以墨玉县最大,民丰县最小。墨玉县在和田地区的$WF_{ani\text{-}con}$中占有很高的比例,2013年墨玉县$WF_{ani\text{-}con}$为2.59×10^8 m^3,为历年最高值,占同年和田地区$WF_{ani\text{-}con}$的29.3%,2018年减少至1.09×10^8 m^3,使得和田地区$WF_{ani\text{-}con}$总量减小。墨玉县作为和田地区动物水资源消耗主体,其$WF_{ani\text{-}con}$的变化对和田地区的$WF_{ani\text{-}con}$具有重要影响。

2.2 和田地区农业生产水足迹变化过程分析

由图4可知,1989—2018年的30 a间,和田地区农业生产水足迹(WF_{agr})经历了快速增长(1989—2009年,阶段1)、缓慢增长(2009—2015年,阶段2)和明显下降(2015—2018年,阶段3)3个阶段,各阶段的WF_{agr}变化以农作物生产蓝水足迹($WF_{cul\text{-}blue}$)的增减为主导因素,3个阶段分别对应着$WF_{cul\text{-}blue}$的增加、基本稳定和减少。农作物种植面积的不断增长,增加了农作物生长对水资源的消耗,在和田地区干旱的气候环境影响下,使得农作物生产对蓝水的需求不断增加,从而产生了农业生产水足迹的快速增长阶段。其中,1989—2009年WF_{agr}快速增加,



注:由于数据较多,此图仅以间隔两年的数据绘制。

图2 和田地区农作物生产非灰水足迹时空变化

Fig. 2 Spatial-temporal variation of non-grey water footprint of crop production in Hotan Prefecture

表现为 $WF_{cul\text{-}blue}$ 和动物产品生产非灰水足迹($WF_{ani\text{-}con}$)的快速增加。$WF_{cul\text{-}blue}$ 增长91.83%,$WF_{ani\text{-}con}$ 增长182.13%,WF_{agr} 由 17.45×10^8 m³ 增加至 36.98×10^8 m³,增长2.1倍,年均增长率为10.36%;2009—2015年 WF_{agr} 进入缓慢增加阶段,以 $WF_{cul\text{-}blue}$ 的缓慢增长和 $WF_{ani\text{-}con}$ 的相对稳定为特征。农作物生产蓝水足迹仅增加 1.19×10^8 m³,$WF_{ani\text{-}con}$ 稳定在 7.69×10^8 m³左右,WF_{agr} 于2015年达到峰值 40.48×10^8 m³,年均增长率为2.02%;2015—2018年 WF_{agr} 呈明显的下降趋势,$WF_{ani\text{-}con}$、$WF_{cul\text{-}blue}$ 和农作物生产灰水足迹($WF_{cul\text{-}grey}$)均明显减小,WF_{agr} 由峰值减小至 32.12×10^8 m³,其中,$WF_{ani\text{-}con}$、$WF_{cul\text{-}blue}$ 和 $WF_{cul\text{-}grey}$ 分别减少26.93%、

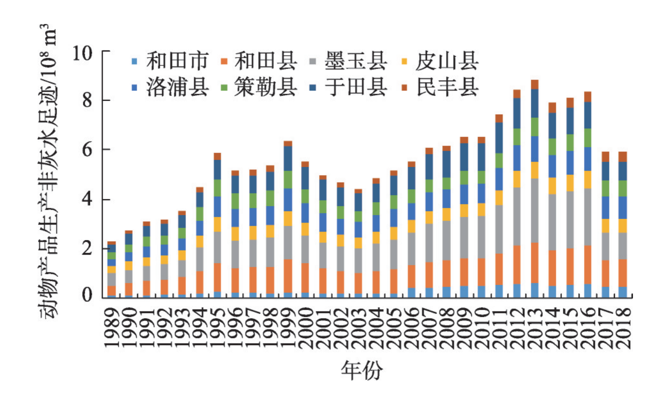
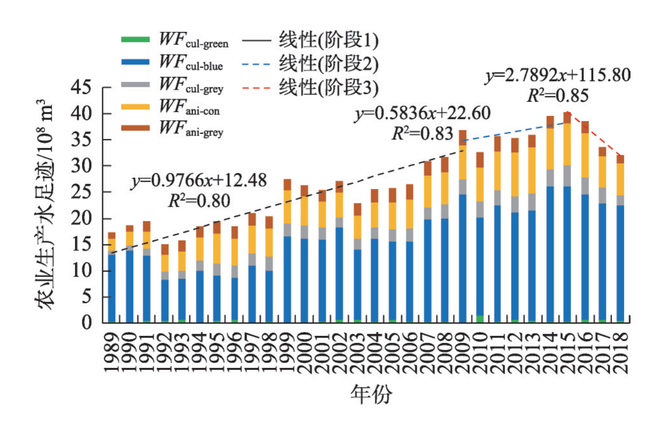


图3 和田地区动物产品生产非灰水足迹变化及地域组成

Fig. 3 Changes and regional composition of non-grey water footprint of animal products production in Hotan Prefecture



注:$WF_{ani\text{-}grey}$、$WF_{ani\text{-}con}$、$WF_{cul\text{-}grey}$、$WF_{cul\text{-}blue}$、$WF_{cul\text{-}green}$分别表示动物产品生产灰水足迹、动物产品生产非灰水足迹、农作物生产灰水足迹、农作物生产蓝水足迹、农作物生产绿水足迹。下同。

图4 和田地区农业生产水足迹组成及变化趋势

Fig. 4 Composition and variation trend of water footprint of agricultural production in Hotan Prefecture

14.17%和50.82%。农业生产灰水足迹以化学需氧量(COD)为主要污染源,其在各年WF_{agr}所占比例较小,对和田地区的水资源安全无显著影响。

以各阶段节点为典型年,取1989年、2009年、2015年和2018年,分析和田地区农业生产水足迹(WF_{agr})组成及空间分布(表3,图5)。在空间分布上,WF_{agr}整体呈现西高东低的分布规律,西部以墨玉县为最高值,以和田市为低值夹点。东部以于田县WF_{agr}为高值区分割策勒县与民丰县。和田地区西部为和田河的发源与流经地,充足的水资源量极大的满足了沿途各县市的水资源需求,使得西部呈现WF_{agr}高值区。东部为低值区,其中策勒县、民丰县种植业与畜牧业的耗水量在和田地区长期处于较低水平,使两县在各年WF_{agr}中均表现为低值。在组成上,和田地区WF_{agr}以水资源消耗为主,农业生产非灰水足迹(WF_{con})占农业生产水足迹的比例先减少后升高。1989年所占比例最高,WF_{con}占97.61%,WF_{grey}仅占2.39%。农作物生产与动物产品生产以8:2的比例组成和田地区农业生产水足迹,WF_{cul}所占比例由1989年的97.65%,经历了先减少后增大的变化,至2018年为85.94%,其中,农作物生产蓝水足迹($WF_{cul\text{-}blue}$)在88.16%~95.71%变化,2015年其所占比例低于90%,是因该年农作物生产时以氮肥为主的农业化肥使用量的大量增加,使农业生产灰水足迹($WF_{cul\text{-}grey}$)比例增长至10.64%。农业生产绿水足迹($WF_{cul\text{-}green}$)仅占到0.61%~2.38%,这符合和田地区降水稀少、蒸发强烈、绿水资源匮乏的自然条件,同时也与全疆农作物生产的耗水形式相符合,即张沛等[30]对新疆农业用水的研究结果表明,新疆农作物种植整体以灌溉为主体,降水仅占极小的一部分。

2.3 基于农业生产水足迹的和田地区水资源安全分析评价

基于农业生产水足迹计算结果,以水足迹强度(*WFS*)和水资源压力(*WFP*)指标分析和田地区水资源安全状态的时空变化。如图6a所示,*WFS*呈近对数的减小趋势,1999年为其突变增加点。水足迹消

表3 和田地区农业生产水足迹各组分占比

Tab. 3 The proportion of each component of agricultural productionwater footprint in Hotan Prefecture /%

年份	WF_{agr}		WF_{cul}			WF_{ani}	
	WF_{con}	WF_{grey}	$WF_{cul\text{-}green}$	$WF_{cul\text{-}blue}$	$WF_{cul\text{-}grey}$	$WF_{ani\text{-}con}$	$WF_{ani\text{-}grey}$
1989	97.61	2.39	2.38	95.72	1.90	77.01	22.99
2009	88.68	11.32	0.61	91.70	7.69	71.24	28.76
2015	88.42	11.58	1.20	88.16	10.64	84.10	15.90
2018	93.59	6.41	1.84	92.79	5.37	87.25	12.75

注:WF_{agr}、WF_{cul}、WF_{ani}、WF_{con}、WF_{grey}分别表示农业生产水足迹、农作物生产水足迹、动物产品生产水足迹、农业生产非灰水足迹、农业生产灰水足迹。下同。

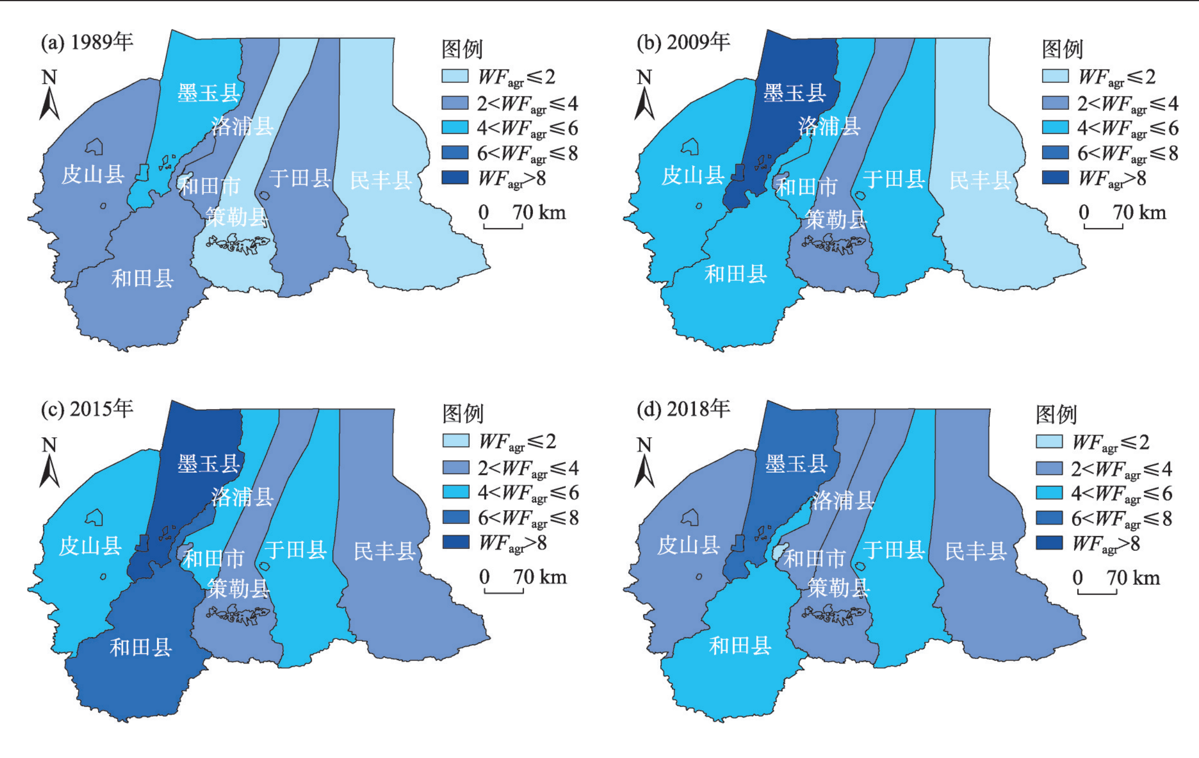


图5　和田地区农业生产水足迹空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of water footprint of agricultural production in Hotan Prefecture

耗强度(WFS_{con})的变化趋势与*WFS*基本保持一致，其对*WFS*的变化起主导作用，灰水足迹强度(WFS_{pol})辅之，二者均呈对数趋势减小。其中*WFS*由1989年的1.86 $m^3\cdot a^{-1}$，减小至2018年的0.10 $m^3\cdot a^{-1}$，减少约94.44%，表明单位GDP所消耗的水资源量仅为1989年的1/19，水资源利用效率得到了显著提高。1999年*WFS*突然增加是农业生产水足迹中以农作物蓝水足迹为主的增加与和田地区GDP减少共同作用而导致WFS_{con}快速增加的结果。WFS_{pol}从1989年的0.21 $m^3\cdot a^{-1}$变化至2018年的0.01 $m^3\cdot a^{-1}$，灰水足迹强度变为原来的1/21，表明单位GDP所产生的灰水足迹显著下降。*WFS*的显著变化趋势表明和田地区的水资源利用效率的快速提升，使得单方水能够产生更高经济价值的同时，减少了污染性离子的产生，而这主要是指以农作物生产为主的水资源的高效利用与农业化肥施用量的有效减少。以和田地区2018年的水足迹强度与其他地区相比较，王丽川等[31]的研究结果显示2018年北京市的*WFS*为0.0028 $m^3\cdot a^{-1}$，王宁等[32]对陕西省2018年*WFS*的研究结果为0.0224 $m^3\cdot a^{-1}$，和田地区的*WFS*是北京市的37.2倍，是陕西省的4.6倍，这表明和田地区的水资源利用效率与经济水平高度发达的北京市和中等发展程度的陕西省相比，仍然有很大的差距，和田地区的水资源利用效率仍处于较低水平。

由图6b可知，1989—2015年和田地区的水资源压力(*WFP*)等级随时间增长而波动上升，2015年后出现*WFP*缓慢减小的趋势。但其值始终小于1，表明和田地区一直处于水资源安全状态。按照水资源压力等级的划分可将*WFP*分为以2006年为节点的两个阶段，1989—2006年水资源压力处于中低水平，2007年开始和田地区的水资源压力基本在较高和很高的状态变化。结果与吴雪梅等[33]通过构建评价指标体系对2005—2018年和田地区水资源压力状态的研究结果保持一致，反映和田地区的水资源为安全状态。图6b显示，和田地区水资源压力最高的年份为2015年，*WFP*为0.87，水资源压力很高，其后*WFP*逐渐减小至2018年的0.73，和田地区的水资源压力有缓解的趋势，这一变化的产生是因为在和田地区可用水资源量基本不变的情况下，因农作物种植面积减少而引起的以农作物生产蓝水足迹减小为主的农业生产水足迹的缓慢减小，导致了*WFP*的减小。和田地区水消耗程度(WFP_{con})2007—2018年处于中等偏高的状态，水污染程度(WFP_{pol})一直处于极低的状态。表明和田地区的水资源能基本满足水量需求，同时污染物的产生量极少。

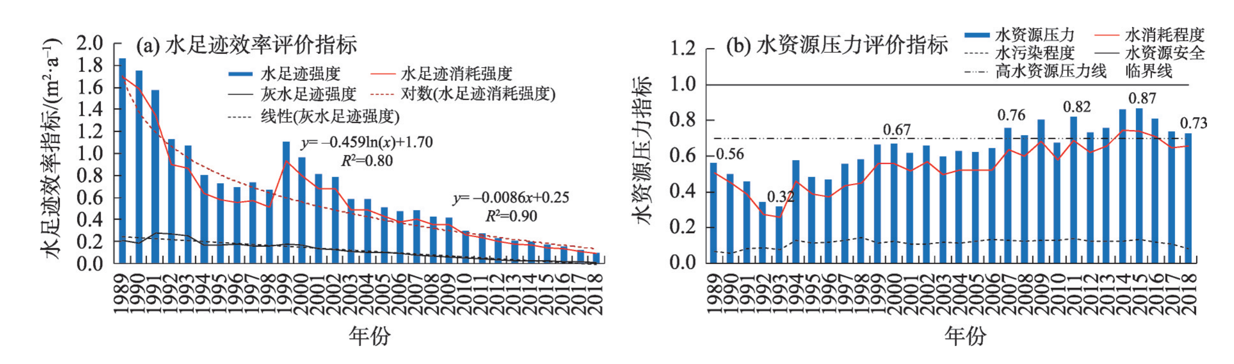


图6　和田地区水资源安全评价指标变化

Fig. 6　Changes of water resources security evaluation indexes in Hotan Prefecture

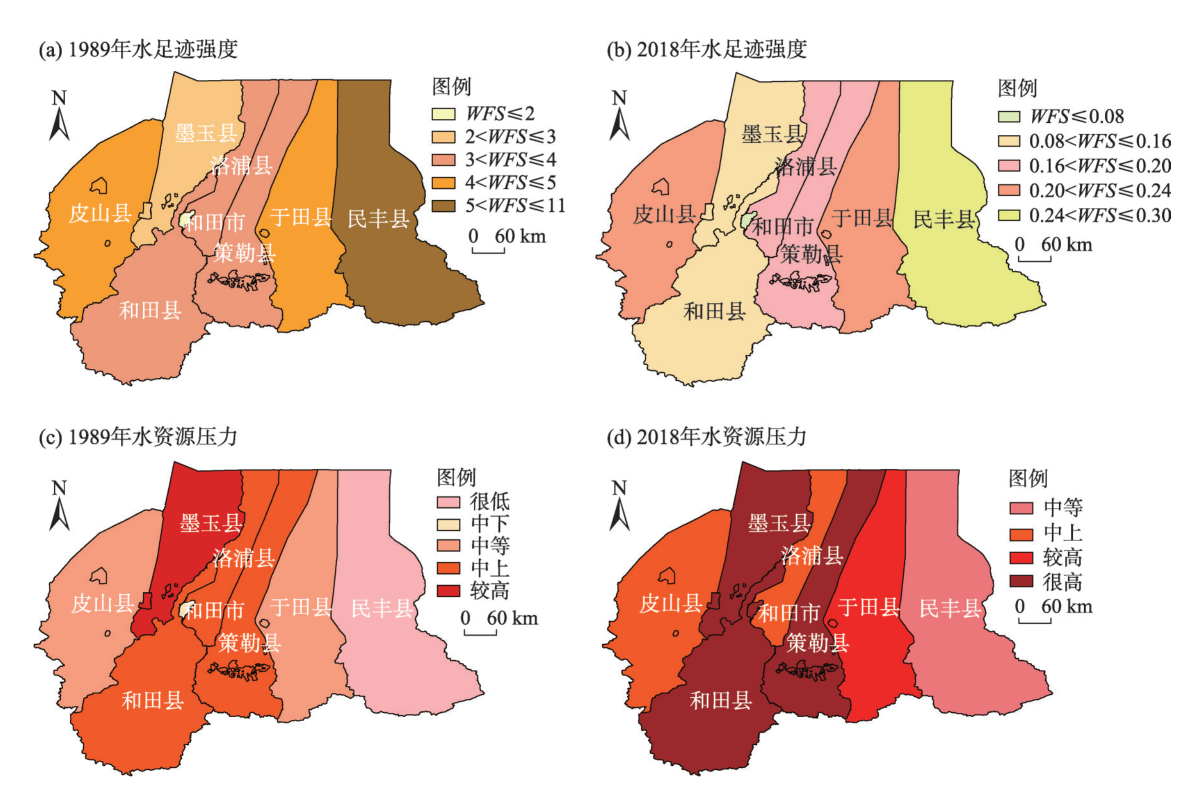


图7　和田地区水资源安全评价指标空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of water resources security evaluation indexes in Hotan Prefecture

以1989年和2018年分析和田地区*WFS*和*WFP*的空间分布可知(图7)，1989年的*WFS*突出表现为“一高一低”，以和田市最低为1.17 $m^3\cdot a^{-1}$，民丰县最高为10.93 $m^3\cdot a^{-1}$，其余县市在2.67~4.90 $m^3\cdot a^{-1}$之间变化。1989年的和田地区农业灌溉方式粗犷，水资源利用效率极低，同时工业水平较低，主要以直接农产品作为经济增收的来源，所以导致了水资源消耗量大，但经济效益不高，从而使得水足迹强度值很高。2018年*WFS*在0.03~0.30 $m^3\cdot a^{-1}$之间变化，以和田市水资源利用效率最高，*WFS*为0.03 $m^3\cdot a^{-1}$，*WFS*最大的民丰县与和田市相差了10倍。以2018年*WFS*与1989年相比较，和田地区的水资源利用效率提升显著，以民丰县的变化最为明显，减小了10.63 $m^3\cdot a^{-1}$。在空间上，以和田河流经的和田市、墨玉县、和田县、洛浦县和策勒县连片区域的水资源利用效率高于其他县、市。从和田地区*WFP*的空间格局变化可知(图7c~7d)，各县市的水资源压力明显升高。1998年*WFP*最高的县为墨玉县(*WFP*=0.71)，属于中等偏高的水资源压力状态。最低为民丰县(*WFP*=0.25)，水资源压力状态为很低，其余县市均处于中等左右的状态。2018年和田地区各县市的水资源压力程度普遍较高，仅民丰县的水资源

压力为中等状态,其中墨玉县、和田市、和田县和策勒县的 WFP 在0.86~0.90之间变化,水资源压力状态为很高。

由上述可知,和田地区以墨玉县为首的和田县、和田市和策勒县的水足迹强度值偏小,水资源利用效率高,但同时也是水资源压力高的区域。在水资源利用效率高,带来更多经济效益的同时,对水资源量的需求也更多,这也说明了经济发展与水资源量需求之间的必然联系,经济的更好发展必须要有一定的水资源量来支撑。

和田地区在"全面对口援疆"的政策支持与"一带一路"战略的经济发展机遇下,必将迎来进一步的发展,区域水资源量能否满足经济发展需求,以及如何解决发展与用水需求的矛盾将成为和田地区面临的巨大挑战。未来和田地区应充分发挥水资源开发利用的可发展空间,推动水资源压力较低、发展较为滞后的民丰县和皮山县等县市的经济发展,谋求和田地区社会经济的均衡发展。同时,积极响应全疆退地减水、高效节水的农业节水灌溉的政策措施,降低农业用水。严格落实水资源开发利用的"三条红线",适当推动区域工业发展。此外,鼓励以低耗水、低能耗的农产品再加工为主的相关产业发展,提高农业生产的经济效益,进一步促进红枣、甜瓜、葡萄等特色农产品的推广及旅游业的发展。在以节约水资源、促进社会经济发展为目标的政策指导下,多方面地提高和田地区水资源利用效率和社会经济发展,实现区域水资源利用效率和经济效益的同步提升。

3 结 论

本文基于和田地区1989—2018年的农业生产水足迹,分析和评价了区域水资源安全状态。得出的主要结论如下:

(1) 近30 a和田地区农业生产非灰水足迹占区域农业生产水足迹的95%以上,各县、市农作物生产非灰水足迹($WF_{cul-con}$)呈波动增长的变化趋势,表现为以粮食作物消耗为主,经济作物消耗次之。在空间分布上,以墨玉县的水资源消耗量最大,年均 $WF_{cul-con}$ 为 3.8×10^8 m³;动物产品生产非灰水足迹($WF_{ani-con}$)呈现出1989—2013年随时间变化的不平稳增长和2013—2018年的明显下降2个阶段,最高值出现于2013年($WF_{ani-con}=8.84\times10^8$ m³),$WF_{ani-con}$ 的最大变幅为381.78%。

(2) 和田地区农业生产水足迹(WF_{agr})由农作物生产水足迹和动物产品生产水足迹以约8:2的比例组成。在时间变化上,经历了快速增长、缓慢增长和明显下降3个阶段,各阶段的变化主要受农作物生产蓝水足迹的增减影响,于2015年达到 WF_{agr} 的最大值 40.48×10^8 m³。在空间分布上,WF_{agr} 呈现西高东低的分布规律,西部以墨玉县为最高值,东部以于田县为 WF_{agr} 高值区分割策勒县与民丰县两县。

(3) 1989—2018年和田地区的水资源状况为安全。随时间变化,区域水足迹强度(WFP)呈对数的趋势减小,水资源压力(WFS)则主要表现为不平稳地缓慢增加,表明和田地区水资源利用效率提升显著,同时水资源短缺的威胁也在不断加重。

参考文献(References):

[1] 李丽, 刘诗奇, 王平, 等. 基于负载指数的中蒙俄经济走廊水资源开发潜力评价[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 910-918. [Li Li, Liu Shiqi, Wang Ping, et al. Evaluation of water resource exploration potential of the China-Mongolia-Russia Economic Corridor based on carrying capacity[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 910-918.]

[2] Sithirith Mak. Downstream state and water security in the Mekong Region: A case of cambodia between too much and Too little water [J]. Water, 2021, 13(6): 802-814.

[3] 吐尔逊·买买提明. 和田地区水资源利用存在的主要问题及对策[J]. 水文, 2015, 35(3): 92-95. [Tursunmo Maimaitiming. How to utilize water resources in Hotan Region[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(3): 92-95.]

[4] 胡栩, 聂勇, 徐霞, 等. 塔里木盆地南缘和田地区土地利用变化的遥感研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 577-590. [Hu Xu, Nie Yong, Xu Xia, et al. Monitoring land-use change in Hetian Tarim Basin, China using satellite remote sensing observation between 1990 and 2016[J]. Progress in Geography, 2020, 39(4): 577-590.]

[5] D'Ambrosio E, Ricci F G, Gentile F, et al. Using water footprint concepts for water security assessment of a basin under anthropogenic pressures[J]. Science of the Total Environment, 2020, 748: 141356.

[6] 贾绍凤, 张军岩, 张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 538-545. [Jia Shaofeng, Zhang Junyan, Zhang Shifeng. Regional water resources stress and water resources security appraisement indicators[J]. Progress in Geography, 2002, 21(6): 538-545.]

[7] Liu J L, Chen J, Yuan Z, et al. Water resource security evaluation of the Yangtze River Economic Belt[J]. Water Supply, 2020, 20(4): 1-13.

[8] 龚巧灵, 官冬杰. 基于BP神经网络的三峡库区重庆段水资源安全评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 292−299. [Gong Qiaoling, Guan Dongjie. Study on water resources security evaluation of Chongqing section of three gorges reservoir based on BP neural network[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 292−299.]

[9] 刘丽颖. 气候变化下贵州省水资源安全空间评价及敏感性分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(5): 714−723. [Liu Liying, Spatial evaluation and sensitivity analysis of water resource security in Guizhou Province under climate change[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(5): 714−723.]

[10] 张城, 李晶, 周自翔. 基于水供给服务空间流动模型的渭河流域水资源安全格局[J]. 地理科学, 2021, 41(2): 350−359. [Zhang Cheng, Li Jing, Zhou Zixiang. Water resources security pattern of the Weihe River Basin based on spatial flow model of water supply service[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(2): 350−359.]

[11] Hoekstra Y A. Water footprint assessment: Evolvement of a new research field[J]. Water Resources Management, 2017, 31(10): 3061−3081.

[12] Falkenmark M. Freshwater as shared between society and ecosystems: From divided approaches to integrated challenges[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences, 2003, 358(1440): 2037−2046.

[13] Veettil V A, Mishra K A. Water security assessment using blue and green water footprint concepts[J]. Journal of Hydrology, 2016, 542(32): 589−602.

[14] Feng H Y, Sun F Y, Liu Y Y, et al. Mapping multiple water pollutants across China using the grey water footprint[J]. Science of the Total Environment, 2021, 785: 147255.

[15] 王雅晴, 冼超凡, 欧阳志云. 基于灰水足迹的中国城市水资源可持续利用综合评价[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 2983−2995. [Wang Yaqing, Xian Chaofan, Ouyang Zhiyun. Integrated assessment of sustainability in urban water resources utilization in China based on grey water footprint[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 2983−2995.]

[16] 郝帅, 孙才志, 宋强敏. 中国能源−粮食生产对水资源竞争的关系——基于水足迹的视角[J]. 地理研究, 2021, 40(6): 1565−1581. [Hao Shuai, Sun Caizhi, Song Qiangmin. Study on the competitive relationship between energy and food production for water resources in China: From a perspective of water footprint[J]. Geographical Research, 2021, 40(6): 1565−1581.]

[17] Garfin M G, Scott A C, Wilder M, et al. Metrics for assessing adaptive capacity and water security: Common challenges, diverging contexts, emerging consensus[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2016, 21(662): 86−89.

[18] 金谦, 桂东伟, 高霄鹏, 等. 新疆主要农作物生产水足迹研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 243−249. [Jin Qian, Gui Dongwei, Gao Xiaopeng, et al. Water footprints of primary crop production in Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 243−249.]

[19] 常玉婷, 尤斌. 基于水足迹理论的干旱区水资源可持续利用评价[J]. 干旱环境监测, 2019, 33(4): 150−154. [Chang Yuting, You Bing. Evaluation of water resources carrying capacity of Xinjiang based on water footprint method[J]. Arid Environmental Monitoring, 2019, 33(4):150−154.]

[20] 和田年鉴编委会. 和田年鉴[M]. 和田: 新疆人民出版社, 2016. [Editorial Board of Hotan Yearbook. Hotan Yearbook[M]. Hotan: Xinjiang People's Publishing House, 2016.]

[21] 惠婞, 陈晓楠, 宋健峰. 基于水足迹的作物生产生态效率评价——以陕西省为例[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 3078−3091. [Hui Xing, Chen Xiaonan, Song Jianfeng. Assessing crop production eco-efficiency based on water footprints: The case of Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3078−3091.]

[22] 洪传春, 刘某承, 张雅静, 等. 时空视角下京津冀农业灰水足迹强度与效率分析[J]. 河北农业大学学报, 2021, 44(2): 128−135. [Hong Chuanchun, Liu Moucheng, Zhang Yajing, et al. Analysis on the intensity and efficiency of agricultural grey water footprint in Beijing-Tianjin-Hebei Region under the perspective of spatial-temporal patten[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2021, 44(2): 128−135.]

[23] Cui S B, Dong H J, Wilson J. Grey water footprint evaluation and driving force analysis of eight economic regions in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(16): 20380−20391.

[24] 曹建廷, 李原园, 张文胜, 等. 农畜产品虚拟水研究的背景、方法及意义[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 829−834. [Cao Jianting, Li Yuanyuan, Zhang Wengshen, et al. Research background, methodological issues and significance on virtual water of crop and livestock production[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(6): 829−834.]

[25] 赵锐, 李红, 贺华玲, 等. 乐山市动物类产品水足迹测算分析[J]. 生态科学, 2017, 36(2): 93−99. [Zhao Rui, Li Hong, He Hualing, et al. Assessment of water footprint of animal products in Leshan City[J]. Ecological Science, 2017, 36(2): 93−99.]

[26] Chapagain K A, Hoekstra Y A. Virtual Water Flows Between Nations in Relation to Trade in Livestock and Livestock Products[M]. Netherlands: UNESCO-INE, 2003.

[27] 于钋, 尚熳廷, 姚梅, 等. 水足迹与主成分分析法耦合的新疆水资源承载能力评价[J]. 水文, 2021, 41(1): 49−54. [Yu Po, Shang Manting, Yao Mei, et al. Water resources carrying capacity evaluation based on water footprint and principal component analysis in Xinjiang[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(1): 49−54.]

[28] 余册册, 赵先贵, 葛孟尧. 基于水足迹理论的新疆1995—2014年水资源评价[J]. 山东农业科学, 2017, 49(8): 94−98. [Yu Cece, Zhao Xiangui, Ge Mengyao. Evaluation of water resources in Xinjiang from 1995 to 2014 based on water footprint theories[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(8): 94−98.]

[29] Yu J W, Long A H, Deng X Y, et al. Incorporating the red jujube

water footprint and economic water productivity into sustainable integrated management policy[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 269: 110828.

[30] 张沛, 龙爱华, 海洋, 等. 1988—2015年新疆农业用水时空变化与政策驱动研究——基于农作物水足迹的统计分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 242-253. [Zhang Pei, Long Aihua, Hai Yang, et al. Spatiotemporal variations and driving forces of agricultural water consumption in Xinjiang during 1988-2015: Based on statistical analysis of crop water footprint[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1): 242-253.]

[31] 王丽川, 侯保灯, 周毓彦, 等. 基于水足迹理论的北京市水资源利用评价[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(4): 680-688. [Wang Lichuan, Hou Baodeng, Zhou Yuyan, et al. Evaluation of water resources utilization in Beijing based on water footprint theory[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 680-688.]

[32] 王宁, 李兆耀, 田晓飞, 等. 基于ESDA方法的黄河流域水足迹强度及空间关联分析[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(2): 196-202. [Wang Ning, Li Zhaoyao, Tian Xiaofei, et al. Water footprint intensity and spatial association analysis of the Yellow River Basin: Based on ESDA model[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(2): 196-202.]

[33] 吴雪梅, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提·沙吾提, 等. 基于PSO-PPE模型的和田水资源承载力评价研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 228-233. [Wu Xuemei, Tashpolat Tiyip, Mamat Sawut, et al. Evaluation research for the carrying capacity of water resources in Hotan Based on the POS-PPE model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 228-233.]

Spatial-temporal assessment of water resource security based on the agricultural water footprint: A case in the Hotan Prefecture of Xinjiang

ZHANG Lili[1,2], DENG Xiaoya[2], LONG Aihua[1,2], GAO Haifeng[3], REN Cai[1,2], LI Zhiyun[1,2]

(1. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Satellite Application Center for Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China)

Abstract: The Hotan Prefecture is a typical inland arid area. Regional water resource security assessment is of great significance for guiding the development and utilization of water resources and promoting the sustainable development of social economy and water resources. Based on the water footprint theory, this paper studied the composition and spatial-temporal changes of the water footprint of agricultural production in the Hotan Prefecture from 1989 to 2018, then analyzed and evaluated the temporal and spatial pattern changes of water resource security status through water footprint intensity and water resource pressure indicators. The water footprint for agricultural production in Hotan has experienced three stages: rapid growth, slow growth, and obvious decline. It is composed of an approximately 8:2 ratio in terms of the water footprint of crop production and that of animal products. Changes in each stage were dominated by the increase and decrease in the blue water footprint of crop production, which were spatially high in the west and low in the east. The intensity of the water footprint decreased according to a logarithmic trend; by 2018, it had shrunk to 1/19 of the original size. The pressure value for water resources in the Hotan Prefecture has not reached 1 for many years; the water resource have remained in a safe state, and the pressure on water resource has been relatively high in the past 10 years. Overall, the water footprint of agricultural production in Hotan has fluctuated and increased over time, the efficiency of water use has increased significantly, and the pressure on water resources has also increased simultaneously, constantly threatening the security of regional water resource.

Keywords: water footprint of crop production; animal product production water footprint; grey water footprint; water resource security; Hotan Prefecture